

圧電薄膜を用いた無線通信用高周波デバイスの研究

著者	青田 雄嗣
号	53
学位授与番号	4103
URL	http://hdl.handle.net/10097/42517

氏 名	あお た ゆう じ 青 田 雄 嗣
授 与 学 位	博士（工学）
学 位 授 与 年 月 日	平成 21 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程）電気・通信工学専攻
学 位 論 文 題 目	圧電薄膜を用いた無線通信用高周波デバイスの研究
指 導 教 員	東北大学教授 坪内 和夫
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 坪内 和夫 東北大学教授 櫛引 淳一 東北大学教授 高木 直

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序論

無線通信規格を適宜切り替えて用いることで，シームレスで高速通信が可能なディペンダブルワイヤレスシステムの実現に向け，無線通信端末用 RF デバイスの小型化，高周波化，高性能化は必要不可欠である。本論文では，弾性波デバイス，特に，圧電薄膜共振器（FBAR）に着目し，FBAR の低損失化，高周波化について述べる。さらに，FBAR を用いた無線端末用 RF デバイスとして FBAR 発振器を検討するものであり，全 5 章から成る。

第 2 章 FBAR 用電極及び圧電膜の検討

FBAR の低損失化と広帯域化を目指し，FBAR 用下部電極材料として Ru/Ta を検討する。次に，圧電材料である AlN の成膜方法として有機金属化学気相成長（MOCVD）法を検討し，Ru/Ta 下部電極上に高配向な AlN が得られることを示す。

FBAR 用電極材料は，高音響インピーダンス，低抵抗率，AlN が c 軸配向する結晶構造を有することが必要である。また，MOCVD 法により高温で AlN を成膜するため，下部電極材料は高融点，MOCVD 法のプロセスガスに対して安定であることが求められる。従来用いてきた Mo 下部電極は MOCVD プロセス中の電極抵抗の劣化が問題であった。そこで Mo に代わり下部電極材料として Ru を検討する。Ru は従来の Mo と比較して抵抗率は大きい，音響インピーダンスが大きいため FBAR の低損失化が期待される。ここで，Ru と基板の接着層として Ta を 5nm 用いた。

MOCVD プロセス中における Mo 下部電極と Ru/Ta 下部電極の影響を比較する。H₂アニール後にお

いては, Ru/Ta 下部電極は 1100℃ 以下で表面平坦性, 配向性共に Mo 下部電極より良好であった。特に, Ru/Ta 下部電極の配向性は 2° 程度まで改善可能であった。また, NH₃ アニール後においても 1100℃ 以下で電極の抵抗劣化が無いことを示した。各下部電極に MOCVD 法により AlN を成膜する。成膜条件は, 成膜温度は 1050℃, 反応管内圧力は 20Torr, V/III は 25000 とした。Ru/Ta 下部電極上の AlN は c 軸半値幅が 1.2° と Mo 下部電極上の 2.7° に比べ高配向となることを示した。

FBAR の高周波化に向け Ru/Ta 下部電極, AlN の薄膜化を検討する。Ru は 20nm まで AlN の c 軸半値幅 3° 以下を維持できることを示した。さらに, AlN を 30nm まで薄膜化した実測結果より AlN は膜厚によらず c 軸半値幅が 1.5° 以下と良好であることを述べた。

以上より, FBAR の低損失化及び高周波化に必要な不可欠な要素である AlN の高配向化には, Ru/Ta 下部電極と MOCVD 法が適していることを示した。

第 3 章 FBAR の設計と試作・評価

第 2 章で検討した Ru/Ta 下部電極を用いて FBAR を試作し, さらに, MOCVD 法による AlN と Ru/Ta 下部電極が FBAR の高周波化に適していることを示す。

5GHz 帯 FBAR の試作において, Mason の等価回路を用いた FBAR の膜厚設計を行う。

共振周波数を 5GHz に固定し, 下部電極 Ru/Ta, 上部電極 Mo, AlN の膜厚を変化させると電気機械結合係数 (k_{eff}^2) が変化するため, k_{eff}^2 が最大となる膜厚を決定した。設計した FBAR の各膜厚は Mo/AlN/Ru/Ta/SiO₂ がそれぞれ 100nm, 350nm, 100nm, 5nm, 200nm とした。設計した構造を用いて 5GHz 帯 FBAR の試作を行った結果, 良好な共振特性を得た。試作した 5GHz 帯 FBAR の共振の Q 値は 329, k_{eff}^2 は 7.0% と良好であった。従来の Mo 下部電極で試作した FBAR の結果に比べ, 電極空化の影響を低減したため電極抵抗の劣化が改善した。さらに, 下部電極の音響インピーダンスを大きくしたことと, AlN 膜質を改善したため共振部の損失が 1/6 まで低減した。また, Ru/Ta 下部電極を用いたことにより AlN 膜質が改善したため, k_{eff}^2 は従来の Mo 下部電極の場合に比べ改善し, Mason の等価回路により得たシミュレーション結果に良く一致した。

Ru/Ta 下部電極と MOCVD 法による AlN を用いた FBAR の高周波化の可能性について検討する。まず 5GHz 帯 FBAR と同じ構造を用いて, AlN 厚さを 100nm まで薄膜化して FBAR を試作する。その結果, AlN をさらに薄膜化しても FBAR が作製可能であることを示し, 7GHz 付近で Q 値は 312, k_{eff}^2 は 7.3% と良好な共振特性を確認した。以上の実測結果をもとにした Mason の等価回路を用いたシミュレーションにより FBAR の高周波化について検討する。まず絶縁膜である SiO₂ を 200nm 取り除くことで共振周波数を 7GHz から 10GHz 程度まで高周波化可能である。さらに, 第 2 章より AlN は膜厚に

よらず高配向であり、下部電極である Ru は 20nm まで薄膜化が可能であると述べた。よって、AlN を 30nm まで薄膜化し、下部電極 Ru/Ta を 20nm と 5nm、上部電極 Mo を 20nm 程度まで薄膜化することで、FBAR の共振周波数を 40GHz 以上まで高周波化可能であることを示した。

以上より、Ru/Ta 下部電極と MOCVD 法による AlN が FBAR の高周波化に適していることを示した。

第 4 章 FBAR を用いた RF デバイスの検討

近年の無線通信の高周波化により、共振部の Q 値の劣化による発振器の位相雑音の増大が問題である。そこで、FBAR の高 Q を用いた無線端末用 FBAR 発振器の検討を行う。

FBAR 発振器の発振回路としてはコルピッツ型を用いる。ここで、高周波において FBAR と発振回路の接続が問題である。そこで、一般的に基板間接続に用いられている Au ワイヤーボンディング技術と、近年基板の三次元実装に用いられているスタッドバンプボンディング (SBB) 技術を比較し、GHz 帯 FBAR 発振器に適する実装技術を検討する。実測により各実装方法による寄生インダクタンス成分を比較した結果、Au ワイヤーボンディングは高周波において Au のワイヤーの寄生インダクタンス成分が大きく、これに対して、SBB 実装は寄生インダクタンス成分がほとんど無いことを示した。よって、5GHz 帯における FBAR の発振回路への実装方法は SBB 実装を採用した。さらに、実装後の FBAR を測定した結果、所望の 5GHz において良好な共振器特性を示すことを確認した。

FBAR の実装を考慮し、ディスクリート部品を用いた FBAR 発振回路が 5GHz 帯で発振するように設計した。トランジスタには低位相雑音化を図るためヘテロ接合バイポーラトランジスタを用いた。実測の結果、所望の 5GHz で FBAR 発振器が発振することを確認した。しかし、プリント基板の損失や寄生容量等の影響により試作した FBAR 発振器の位相雑音が大きく劣化した。また、ディスクリート部品中の寄生容量、寄生インダクタンス成分により発振器の設計に制約が生じる。そこで、これらの問題点を改善することと、回路の小型化、低消費電力化に向けた Si CMOS を用いた発振回路の IC 化をシミュレーションにより検討する。その結果、5GHz において従来の LC 型の発振器と比較して FBAR 発振器が位相雑音を 20dB 程度改善可能であることを示した。

以上より、FBAR の実装方法として SBB 実装を採用し、ディスクリート部品を用いた FBAR 発振器が所望の 5GHz で発振することを確認した。さらに、発振回路を IC 化することを検討し、従来の LC 発振器に比べ FBAR 発振器は位相雑音を 20dB 程度改善可能であることを示した。

第 5 章 結論

本章では、各章で得られた結果を述べるとともに、今後の展望を示した。

論文審査結果の要旨

複数の無線通信方式を一つの端末で通信可能とするディペンダブルワイヤレスシステムを実現するためには、RF デバイスの小型化、高周波化が必須である。特に、小型、薄型で Q 値の高い共振子の実現可能な圧電薄膜共振器 (FBAR) の高周波化は今後ますます重要となる。本論文では、FBAR の高周波化、高性能化を目指すとともに、FBAR を用いた RF デバイスとして FBAR 発振器の研究をまとめたものであり、全文 5 章よりなる。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、FBAR 用下部電極材料の検討と圧電材料である AlN の高品質化について述べている。有機金属化学気相成長法 (MOCVD 法) による AlN 成膜において、下部電極材料は Ru/Ta 電極が適していることを示し、c 軸半値幅が 1.2° である高配向な AlN 薄膜を得た。さらに、MOCVD 法による AlN 成膜は厚さに依存せず高配向可能であることを示し、 $0.03\mu\text{m}$ 程度の薄膜化が実現できることを示した。これは、FBAR の高性能化に加え、共振周波数のさらなる高周波化に向けて有効な技術であり、非常に重要な成果である。

第 3 章では、Ru/Ta 下部電極を用いた FBAR の設計と試作について述べている。Ru/Ta 下部電極を用いることで、従来の Mo 下部電極で試作した FBAR に比べ共振部の損失が $1/6$ まで改善した。また、共振周波数の高周波化を目指し、AlN 厚さ $0.1\mu\text{m}$ の FBAR を試作した結果、共振周波数 7GHz を実現した。さらに電極の薄膜化を行うことで FBAR の共振周波数を 40GHz 以上まで高周波化することが可能であることを示した。これは、Ru/Ta 下部電極と MOCVD 法により成膜された AlN が FBAR の高周波化に適していることを示しており、極めて重要な知見である。

第 4 章では、FBAR を用いた無線端末用発振器の検討について述べている。スタッドバンプボンディング技術を用いた FBAR の実装方法の検討と、発振器の設計と試作を行い、試作した FBAR 発振器が所望の周波数で発振することを示した。さらに、FBAR 発振器の IC 一体化設計について検討し、従来の LC 発振器と比べ位相雑音が 20dB 程度改善できることを示した。これは、低位相雑音、小型、高周波化が可能な無線通信端末用高性能発振器の実現の可能性を示しており、この成果は極めて大きい。

第 5 章は結論である。

以上要するに本論文は、AlN の成膜技術の検討を行うことで FBAR 共振周波数の高周波化の可能性を示し、さらに高性能発振器への FBAR 適用の有効性を示したもので、無線通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として合格と認める。